

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Josef Bárta**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení

Téma: **Výpočtový projekt průtočného generátoru páry pro zařízení FLEXIVIT**
Computational Project of a Flow-through Steam Generator
for the FLEXIVIT Device

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši na využití technologie FLEXIVIT u bioplynových stanic a na výparník typu BENSON
2. Vypočítejte vlastnosti vlhkého vzduchu, vody, parovodní směsi a pár
3. Vypracujte schéma zařízení FLEXIVIT s průtočným generátorem páry
4. Navrhněte schéma regulace průtočného generátoru páry
5. Proveďte tepelný výpočet průtočného generátoru
6. Vypracujte výpočtový projekt průtočného generátoru a popište postup výroby

Seznam doporučené odborné literatury:


DLOUHÝ, T.. Výpočty kotlů a spalinových výměníků. Skripta ČVUT Praha, 2002. ISBN 80-01-02591-8.
Firemní podklady VÍTKOVICE POWER ENGINEERING a.s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ladislav Vilimec**


Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014



prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry





doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Výpočtový projekt průtočného generátoru páry pro zařízení FLEXIVIT

**Computational project of a flow-through steam generator for the
FLEXIVIT device**

Student:

Bc. Josef Bárta

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Vilimec Ladislav

Ostrava 2014

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny podklady a literaturu.

V Ostravě dne

.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- *Jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 školní dílo*
- *beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).*
- *souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB – TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.*
- *bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).*
- *beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.*

V Ostravě dne

podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Josef Bárta

Adresa trvalého pobytu autora práce :

Perunská 38, Hodonín 695 04

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Ladislavovi. Vilimcovi za metodickou a odbornou pomoc, a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce a také panu Ing. Jaroslavovi Konvičkovi za pomoc při práci ve výpočetním programu EES.

Anotace diplomové práce

BÁRTA, J. *Výpočtový projekt průtočného generátoru páry pro zařízení FLEXIVIT.* Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky 2014, 49 stran, Vedoucí práce: Vilimec, L.

Diplomová práce se zabývá průtočným generátorem páry ve flexibilním energetickém systému FLEXIVIT. V úvodu práce stručně popisují použití systému, používaný pracovní oběh a vlastnosti pracovních médií spolu se schématem oběhu a schématem regulace. Následuje výpočtová část, která vede k cíli diplomové práce a to k návrhu vlastního zařízení PPG.

ANNOTATION OF DISSERTATION

BÁRTA, J. *Computational project of a flow-through steam generator for the FLEXIVIT device.* Ostrava : VŠB – Technical university of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energetics, 2014, 49 pages, Thesis head: Vilimec, L.

This dissertation deals with the flow-through steam generator in the flexible energy system FLEXIVIT. The introduction briefly describes the use of the system, used working circulation and properties of working media along with the circulation and regulation scheme. The following is calculation part that leads to the goal of the dissertation and to the design of a flow-through steam generator device.

Obsah:

PŘEHLED VELIČIN:	8
VÝPOČTOVÉ PARAMETRY:	12
1. ÚVOD	13
2. TECHNOLOGIE FLEXIVIT A VÝPARNÍKY (BENSON)	14
2.1 BRAYTONŮV OBĚH.....	14
2.2. FLEXIVIT.....	17
2.3 VÝPARNÍK TYPU BENSON	21
3. VLASTNOSTI VLHKÉHO VZDUCHU, VODY, VODNÍ PÁRY A PAROVODNÍ SMĚSI	24
3.1 VLHKÝ VZDUCH	24
3.2. VODA A VODNÍ PÁRA, PVS.....	26
4. SCHÉMA ZAŘÍZENÍ FLEXIVIT S PRŮTOČNÝM GENERÁTOREM PÁRY	29
5. SCHÉMA REGULACE PRŮTOČNÉHO GENERÁTORU PÁRY	30
6. TEPELNÝ VÝPOČET PPG	31
6.1 TEPELNÁ BILANCE VÝPARNÍKU:	32
6.2 STANOVENÍ TEPLOT NA VSTUPU/VÝSTUPU V OBLASTI OD 2:	33
6.3 SOUČINITELE PŘESTUPU TEPLA NA STRANĚ VZDUCHU:.....	34
6.4 SOUČINITELE PŘESTUPU TEPLA VODY, PÁRY A PVS:	37
6.5 SOUČINITELE PROSTUPU TEPLA VÝPARNÍKU.....	40
6.6 VÝPOČET STŘEDNÍHO LOGARITMICKÉHO SPÁDU (PROTIPROUD)	41
6.7 CELKOVÁ TEPLOSMĚNNÁ PLOCHA PRO VÝPARNÍK	42
6.8 VÝPOČET DÉLKY VINUTÝCH TRUBEK (VNĚJŠÍ POVRCH).....	44
6.9 CELKOVÁ DÉLKA VINUTÉ ŠROUBOVICE.....	44
7. VÝPOČTOVÝ PROJEKT PPG A POSTUP VÝROBY	46
8. ZÁVĚR	48
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:	49
SEZNAM PŘÍLOH:	50

Přehled veličin:

C_S	$[-]$	Korekční součinitel na uspořádání svazku
C_z	$[-]$	Korekční součinitel na počet řad svazku
C_t	$[-]$	Opravný koeficient na teplotě proudu a stěny
C_l	$[-]$	Opravný koeficient na poměrnou délku
C_m	$[-]$	Opravný koeficient mezikruží
c_p	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita
c_v	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita
d	$[m]$	Vnitřní průměr vinuté trubky
D	$[m]$	Vnější průměr vinuté trubky
F	$[m^2]$	Světlý průřez kanálu
h_{v1c1}	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	Entalpie vody v oblasti OV1
h_{v2c1}	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	Entalpie vody v oblasti OV1
h_{v1c2}	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	Entalpie vody v oblasti OD2
h_{v2c2}	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	Entalpie páry v oblasti OD2
h_{v1c3}	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	Entalpie páry v oblasti PŘ3
h_{v2c3}	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	Entalpie páry v oblasti PŘ3
h_{vz1c1}	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	Entalpie vzduchu v oblasti OV1
h_{vz2c1}	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	Entalpie vzduchu v oblasti OV1
h_{vz1c2}	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	Entalpie vzduchu v oblasti OD2
h_{vz2c2}	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	Entalpie vzduchu v oblasti OD2
h_{vz1c3}	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	Entalpie vzduchu v oblasti PŘ3
k_1	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	Součinitel prostupu tepla v oblasti OV1
k_2	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	Součinitel prostupu tepla v oblasti OD2
k_3	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	Součinitel prostupu tepla v oblasti PŘ3
L_1	$[m]$	Délka vinutí trubek oblast OV1
L_2	$[m]$	Délka vinutí trubek oblast OD2
L_3	$[m]$	Délka vinutí trubek oblast PŘ3

m_v	$[kg \cdot s^{-1}]$	Hmotnostní průtok vody a páry
m_{vz}	$[kg \cdot s^{-1}]$	Hmotnostní průtok vzduchu
P_1	$[bar]$	Tlak vzduchu na vstupu
P_2	$[bar]$	Tlak vzduchu na výstupu
P_3	$[bar]$	Tlak vody na vstupu
P_4	$[bar]$	Tlak páry na výstupu
P_4	$[bar]$	Tlak páry na výstupu
Pr_{v1}	$[-]$	Prandtlůvo číslo vody pro oblast OV1
Pr_{v3}	$[-]$	Prandtlůvo číslo páry pro oblast PŘ3
Pr_{vz1}	$[-]$	Prandtlůvo číslo vzduchu pro oblast OV1
Pr_{vz2}	$[-]$	Prandtlůvo číslo vzduchu pro oblast OD2
Pr_{vz3}	$[-]$	Prandtlůvo číslo vzduchu pro oblast PŘ3
p_c	$[MPa]$	Celkový tlak
p_p	$[MPa]$	Parciální tlak
p_{vs}	$[MPa]$	Tlak suchého vzduchu
p''	$[MPa]$	Tlak syté páry
Q_1	$[kW]$	Tepelný výkon PPG v oblasti OV1
Q_2	$[kW]$	Tepelný výkon PPG v oblasti OD2
Q_3	$[kW]$	Tepelný výkon PPG v oblasti PŘ3
$r_{vinutí}$	$[m]$	Poloměr vinutí trubek v tl. nádobě
$r_{vnější}$	$[m]$	Vnější poloměr tl. nádoby
$r_{vnitřní}$	$[m]$	Vnitřní poloměr tl. nádoby
S_{c1}	$[m^2]$	Celková teplosměnná plocha v OV1
S_{c2}	$[m^2]$	Celková teplosměnná plocha v OD2
S_{c3}	$[m^2]$	Celková teplosměnná plocha v PŘ3
S_p	$[m^2]$	Průtočný průřez na straně vody a páry
Δt_{log1}	$[^{\circ}C]$	Střední logaritmický spád v oblasti OV1
Δt_{log2}	$[^{\circ}C]$	Střední logaritmický spád v oblasti OD2
Δt_{log3}	$[^{\circ}C]$	Střední logaritmický spád v oblasti PŘ3

t_{v1c1}	[°C]	Teplota vody v oblasti OV1
t_{v2c1}	[°C]	Teplota vody v oblasti OV1
t_{v1c2}	[°C]	Teplota vody v oblasti OD2
t_{v2c2}	[°C]	Teplota páry v oblasti OD2
t_{v1c3}	[°C]	Teplota páry v oblasti PŘ3
t_{v2c3}	[°C]	Teplota páry v oblasti PŘ3
t_{vz1c1}	[°C]	Teplota vzduchu v oblasti OV1
t_{vz2c1}	[°C]	Teplota vzduchu v oblasti OV1
t_{vz1c2}	[°C]	Teplota vzduchu v oblasti OD2
t_{vz2c2}	[°C]	Teplota vzduchu v oblasti OD2
t_{vz1c3}	[°C]	Teplota vzduchu v oblasti PŘ3
t_{vz2c3}	[°C]	Teplota vzduchu v oblasti PŘ3
t_{sat}	[°C]	Saturační teplota vody
V_{v1}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	Střední objemový tok vody v OV1
V_{v2}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	Střední objemový tok vody a páry v OD2
V_{v3}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	Střední objemový tok páry v PŘ3
V_{vz1}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	Střední objemový tok vzduchu v OV1
V_{vz2}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	Střední objemový tok vzduchu v OD2
V_{vz3}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	Střední objemový tok vzduchu v PŘ3
w_{v1}	$[m \cdot s^{-1}]$	Střední rychlost vody v OV1
w_{v2}	$[m \cdot s^{-1}]$	Střední rychlost vody a páry v OD2
w_{v3}	$[m \cdot s^{-1}]$	Střední rychlost páry v PŘ3
w_{vz1}	$[m \cdot s^{-1}]$	Střední rychlost vzduchu v OV1
w_{vz2}	$[m \cdot s^{-1}]$	Střední rychlost vzduchu v OD2
w_{vz3}	$[m \cdot s^{-1}]$	Střední rychlost vzduchu v PŘ3
x	[—]	Suchost vody a vodní páry
α_{v1}	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	Součinitel přestupu tepla vody v OV1
α_{v2}	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	Součinitel přestupu tepla vody a páry v OD2
α_{v3}	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	Součinitel přestupu tepla páry v PŘ3

α_{vz1}	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	Součinitel přestupu tepla vzduchu v OV1
α_{vz2}	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	Součinitel přestupu tepla vzduchu v OD2
α_{vz3}	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	Součinitel přestupu tepla vzduchu v PŘ3
η	$[Pa \cdot s]$	Dynamická viskozita
λ_{v1}	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	Tepelná vodivost vody v OV1
λ_{v2}	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	Tepelná vodivost vody a páry v OD2
λ_{v3}	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	Tepelná vodivost páry v PŘ3
λ_{vz1}	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	Tepelná vodivost vzduchu v OV1
λ_{vz2}	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	Tepelná vodivost vzduchu v OD2
λ_{vz3}	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	Tepelná vodivost vzduchu v PŘ3
λ_m	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	Tepelná vodivost oceli
ν_{v1}	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	Kinematická viskozita vody v OV1
ν_{v2}	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	Kinematická viskozita vody a páry v OD2
ν_{v3}	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	Kinematická viskozita páry v PŘ3
ν_{vz1}	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	Kinematická viskozita vzduchu v OV1
ν_{vz2}	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	Kinematická viskozita vzduchu v OD2
ν_{vz3}	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	Kinematická viskozita vzduchu v PŘ3
ρ_{v1}	$[kg \cdot m^{-3}]$	Hustota vody v OV1
ρ_{v2}	$[kg \cdot m^{-3}]$	Hustota vody a páry v OD2
ρ_{v3}	$[kg \cdot m^{-3}]$	Hustota páry v PŘ3
ρ_{vz1}	$[kg \cdot m^{-3}]$	Hustota vzduchu v OV1
ρ_{vz2}	$[kg \cdot m^{-3}]$	Hustota vzduchu v OD2
ρ_{vz3}	$[kg \cdot m^{-3}]$	Hustota vzduchu v PŘ3
σ_1	$[-]$	Poměrná příčná rozteč trubek
σ_2	$[-]$	Poměrná úhlopříčná rozteč trubek

Výpočtové parametry:

Zadané hodnoty vzduchu, vody a parovodní směsi na vstupu a výstupu do PPG

Vzduch

Teplota na vstupu	t_vstupní	=	207,1	[°C]
Teplota na výstupu	t_výstupní	=	154,8	[°C]
Tlak na vstupu	P1	=	4,576	[bar]
Tlak na výstupu	P2	=	4,546	[bar]
Hmotnostní průtok	m_vz	=	1,15	[kg/s]

Voda, parovodní směs

Teplota na vstupu	t_vstupní	=	96,6	[°C]
Teplota na výstupu	t_výstupní	=	154,9	[°C]
Tlak vstup/výstup	P3=P4	=	4,746	[bar]
Hmotnostní průtok	m_v	=	0,02585	[kg/s]

Další parametry

Volena trubka pro vodu a páru	Ø25x2 - 1.4541		
Voleny poloměry tlakové nádoby	r_vnější=	0,396	[m]
	r_vnitřní=	0,354	[m]
	r_vinutí=	0,375	[m]

1. Úvod

V této diplomové práci se zabývám flexibilním energetickým systémem FLEXIVIT, vyvinutým společností Vítkovice Power Engineering. Tento systém využívá vlhký, otevřený Braytonův oběh s nepřímým ohřevem pracovního média pro transformaci energie z odpadního tepla spalín pístových plynových motorů. Systém FLEXIVIT slouží k výrobě elektrické energie, popřípadě jako kogenerační jednotka k výrobě elektřiny a tepla.

Hlavní částí systému je turbosoustrojí, tedy kompresor a plynová turbína uložená na společné hřídeli. Pracovní médium v systému je parovzduchová směs. V diplomové práci se soustředím zejména na zařízení pro výrobu páry a to konkrétně na průtočný generátor páry (PPG), který slouží pro přípravu parovzduchové směsi, jež vznikne vstřikem páry z PPG do vzduchu nasátém z kompresoru turbosoustrojí.

Diplomová práce je rozdělena na teoretickou, "rešeršní" část a na výpočtovou, konstrukční část. Cílem práce je vypracovat výpočtový projekt průtočného generátoru páry pro zařízení FLEXIVIT.

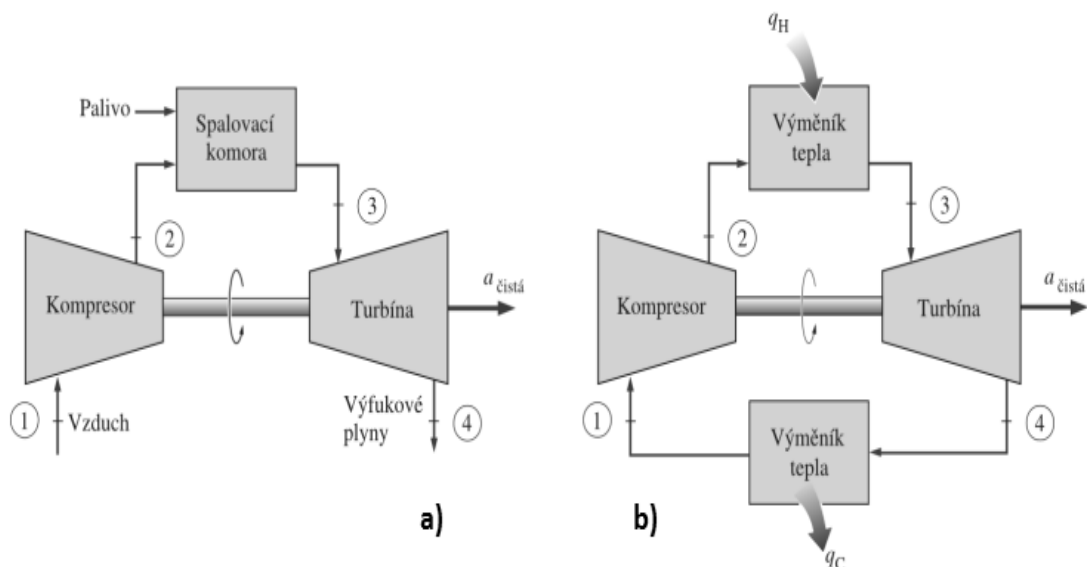
2. Technologie FLEXIVIT a výparníky (Benson)

V této kapitole stručně popisují ideální Braytonův oběh, jelikož flexibilní energetický systém FLEXIVIT využívá vlhkého, otevřeného braytonova oběhu s nepřímým ohřevem pracovního média. Kapitola nastiňuje otevřený a uzavřený oběh, základní vzorce a je doplněna diagramy a schémata. Dále se věnují energetickému systému FLEXIVIT. A v neposlední řadě výměníkům (výparníkům), kvůli průtočnému parogenerátoru.

2.1 Braytonův oběh

Jelikož FES využívá braytonův oběh (též znám jako Ericssonův), popíši v této podkapitole základní poznatky o tomto oběhu. Tento cyklus je znám už od roku 1872 díky A.G. Braytonovi a podobný systém u rovnotlakého motoru použil také Ericsson v roce 1833. Tento oběh se skládá ze tří hlavních částí, kde probíhají termodynamické změny a to kompresoru, spalovací komory (v případě systému FLEXIVIT je spalovací komora nahrazena výměníkem odpadního tepla spalín) a plynové turbíny, které se nejčastěji používají v otevřeném cyklu (Obr 1 - a).

Vzduch je za okolních vstupních podmínek nasáván do kompresoru, kde je stlačen na vyšší hodnoty tlaku a teplot, stlačený a ohřátý vzduch dále vstupuje do spalovací komory, odkud je pracovní médium vedeno na turbínu, kde expanduje a předává svou kinetickou energii na lopatky turbíny, odkud je tato energie transformována na energii mechanickou. Pracovní médium dále odchází do okolí. Cyklus může být navržen i jako uzavřený, kde pracovní plyn po výstupu z turbíny jde přes výměník, jenž pracovnímu plynu odvede teplo a následně se vrací do kompresoru. (obr 1 - b)



Obr. 1 Braytonův oběh a) otevřený b) uzavřený

Děje v oběhu:

1-2 - Izoentropická (adiabatická) komprese v kompresoru

- nasávání vzduchu do kompresoru, vlivem komprese narůstá teplota a tlak, kompresní poměr je obvykle mezi 10-14

2-3 - Izobarický přívod tepla ve spalovací komoře/výměníku

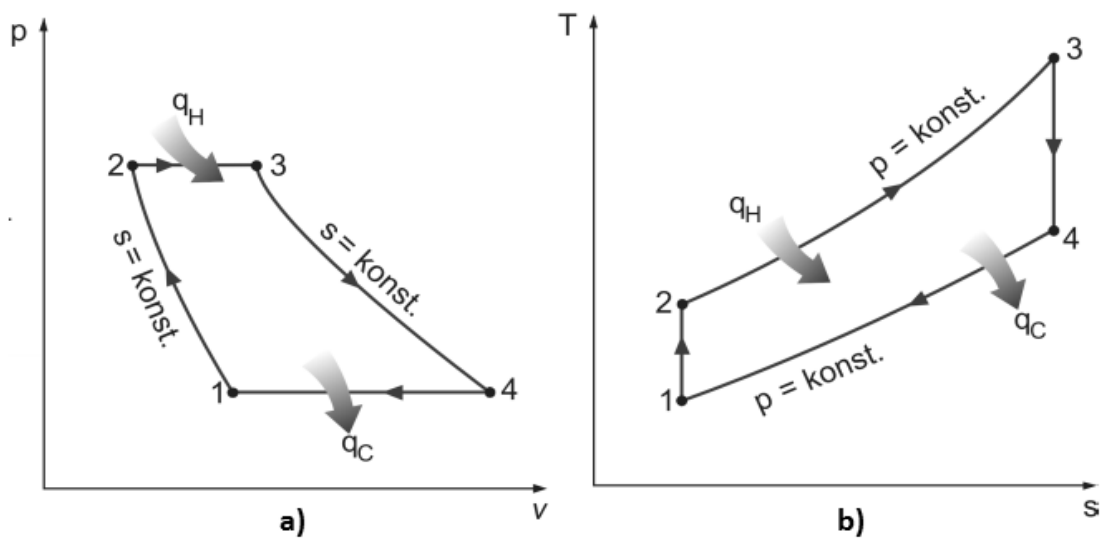
- Stlačený vzduch proudí do SK, kde se smísí s palivem a dojde k zapálení, prudce stoupne teplota a spaliny proudí na plynovou turbínu.

3-4 - Izoentropická (adiabatická) expanze na turbíně

- Horké spaliny expandují na lopatkách turbíny, ta koná práci a pohání generátor. Část práce turbíny je spotřebována na pohon kompresoru, který se nachází na společném hřídeli

4-1 - Izobarický odvod tepla do okolí/výměníku

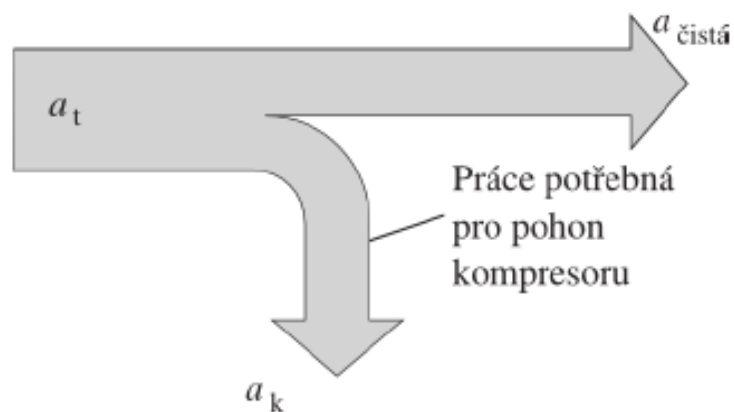
- Spaliny jsou odvedeny do okolí, ale často mají stále tak vysokou teplotu, že se využijí pro ohřev externího média za použití výměníku tepla.



Obr. 2 Ideální a) P-v diagram b) T-s diagram

Práce ideálního braytonova oběhu

$$a_{\text{čistá}} = a_t - a_k \quad (\text{rce 2.1.1.})$$



Obr. 3 Diagram rozdělení práce

Termická účinnost ideálního braytonova oběhu

$$\eta_t = 1 - \frac{c_p \cdot (T_4 - T_1)}{c_p \cdot (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} \quad (\text{rce 2.1.2.})$$

$$\eta_t = \frac{a_t - a_k}{q_h} = \frac{(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)}{(T_3 - T_2)} \quad (\text{rce 2.1.3.})$$

Kompresní poměr ideálního braytonova oběhu

$$\eta_t = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (\text{rce 2.1.4.})$$

2.2. FLEXIVIT

FES pod komerčním názvem FLEXIVIT je integrovaný energetický zdroj s jehož pomocí můžeme využít odpadní teplo spalín z pístových motorů u bioplynových stanic, stávajících energetických zařízení a jiných druhů tepelných agregátů, kde zhodnocuje energii z odpadního tepla, místo vypouštění této energie do okolí. Společnost Vítkovice Power Engineering dodává FLEXIVIT v podobě kontejnerového provedení (obr 4.).

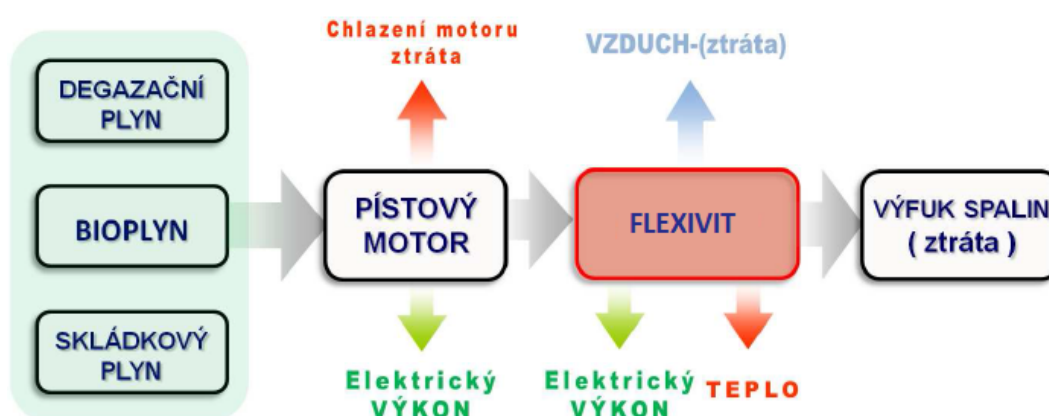
Celý systém pracuje s vlhkým, otevřeným braytonovým oběhem s nepřímým ohřevem pracovního média, v tomto případě parovzduchové směsi, tedy směsi vzduchu nasátého kompresorem a v oběhu vyrobené páry (PPG + ŽTPG), jedná se tedy o plně přírodní pracovní médium, bez jakýchkoliv přidaných chemických látek. Tato směs následně vstupuje do plynové turbíny, kde expanduje a umožňuje využít svou tepelnou energii k výrobě elektřiny v generátoru, popřípadě jako kogenerační provedení pro výrobu elektřiny a tepla.

Systém FLEXIVIT je výjimečný tím, že nedochází ke spotřebě žádného paliva, tedy ani k produkci škodlivin, jelikož zdroj energie je v tomto případě odpadní teplo spalín a to i u odpadního tepla s teplotou nižší nežli 600°C. S malou spotřebou vody z místních zdrojů (například studna, vodní nádrž), kde je FES instalován. Systém neprodukuje žádný odpad a vlastní elektrická spotřeba se pohybuje kolem 1,5 kW.

Běžné zapojení integrovaného energetického systému do stávajícího energetického zařízení s pístovými motory je znázorněno na obr 5. Tato kapitola je zpracována dle literatury [3]

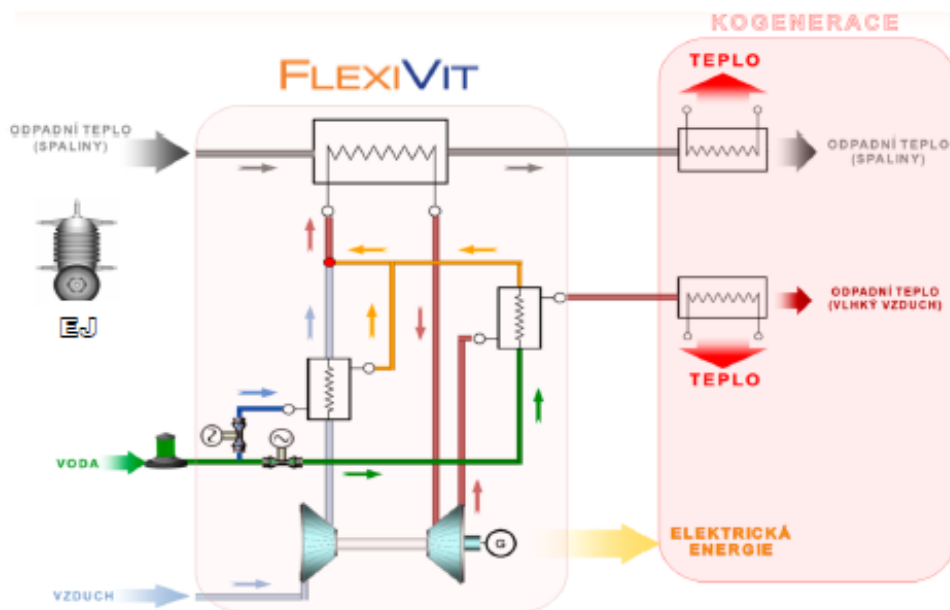


Obr. 4 Kontejnerové provedení FLEXIVIT [3]

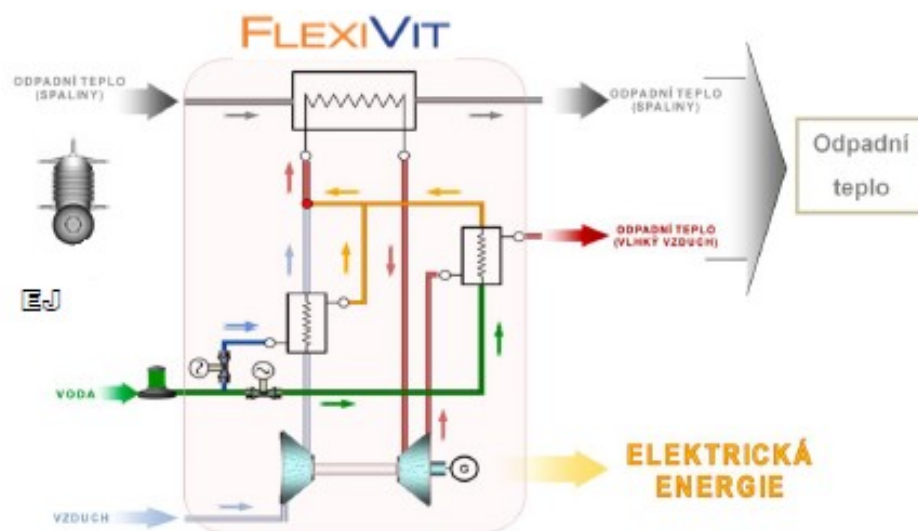


Obr. 5 Energetický zdroj s integrovaným FLEXIVITem [3]

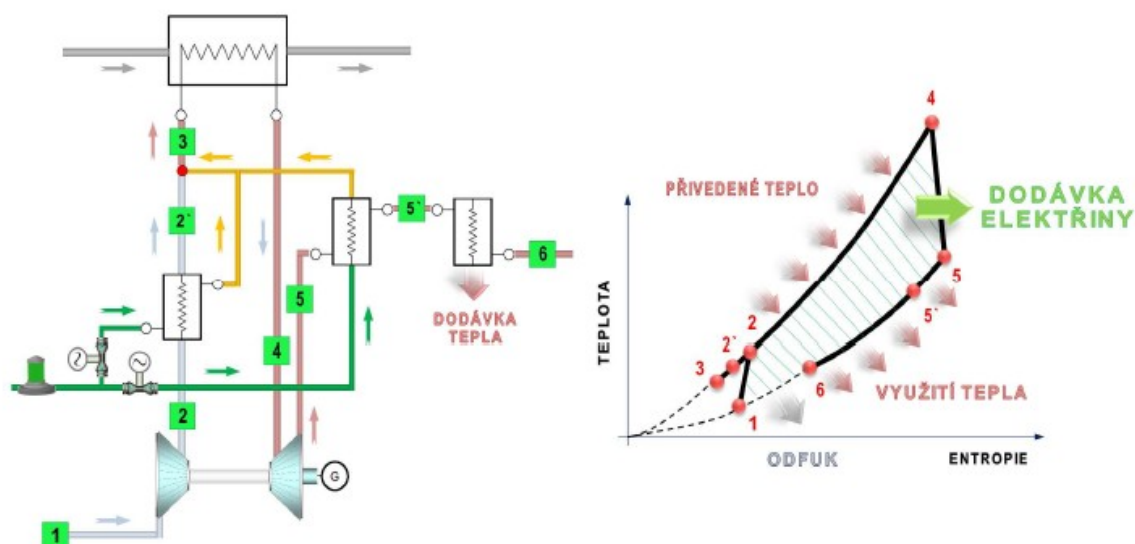
Společnost Vítkovice Power Engineering pracuje s kontejnerovým provedením technologie FLEXIVIT ve dvou variantách. Na obr 6. je znázorněna kogenerační varianta zapojení, která počítá s výrobou elektřiny a tepla, druhá varianta počítá s preferencí výroby elektřiny (obr 7.).



Obr. 6 Kogenerační provedení technologie FLEXIVIT [3]



Obr. 7 Provedení tech. FLEXIVIT s preferencí výroby elektřiny [3]



Obr. 8 Schéma technologie FLEXIVIT[3]

Princip funkce:

- 1 Sání okolního vzduchu do kompresoru
- 1-2 Stlačení vzduchu kompresorem
- 2-2' Ochlazení vzduchu v průtočném parogenerátoru
- 2'-3 Příprava parovzduchové směsi (mísení vzduchu a v oběhu vyrobené páry)
- 3-4 Ohřev paroplynové směsi na pracovní teplotu
- 4-5 Expanze parovzduchové směsi v plynové turbíně
- 5-5' Ochlazení parovzduchové směsi v žárotrubném parogenerátoru
- 5'-6 Ochlazení parovzduchové směsi
- 6 Odfuk vlhkého vzduchu do okolí

Využití technologie FLEXIVIT:

- U energetických zdrojů s pístovými spalovacími motory
 - bioplynové stanice, zemní a skládkový plyn
 - spalování důlního (degazačního) plynu a jiných výhřevných plynů
- Energetické agregáty s produkcí odpadního tepla (spaliny), zvýšení účinnosti
 - bez zvýšení spotřeby paliva
 - bez zvýšení emisí a produkce CO₂
 - bez snížení bezpečnosti (požáry, výbuchy, únik látek..)

2.3 Výparník typu BENSON

Průtočný parogenerátor je v podstatě obyčejný trubkový výměník, jen svým účelem pro vytvoření páry jej nazýváme výparník. Proto v této podkapitole stručně nastíním problematiku výměníků a trubkových výparníků. Podrobný popis však není účelem této diplomové práce.

Běžné typy výměníků podle účelu a použití:

Ohříváky – ohřivanému médiu narůstá teplota, ovšem nedochází zde ke změně fáze

Chladiče – ochlazovanému médiu klesá teplota, ovšem nedochází zde ke změně fáze

Výparníky – ohřivanému médiu (kapalina) narůstá teplota, dochází k varu a změně fáze, vzniká pára

Kondenzátory – teplé médium(pára) je ochlazováno, dochází ke kondenzaci a změně fáze

Přehříváky – sytá pára se dostává na parametry přehřáté páry

Sušárny – dodáváním tepla se dosahuje snížení vlhkosti pevné látky

Rozdělení výměníků podle směrů proudů

Souproudé – směry proudů vstupujících látek mají stejný směr

Protiproudé – směry proudů vstupujících látek mají opačný směr

Křížové – směry proudů látek vzájemně svírají pravý úhel a mohou být vícenásobně překřížené

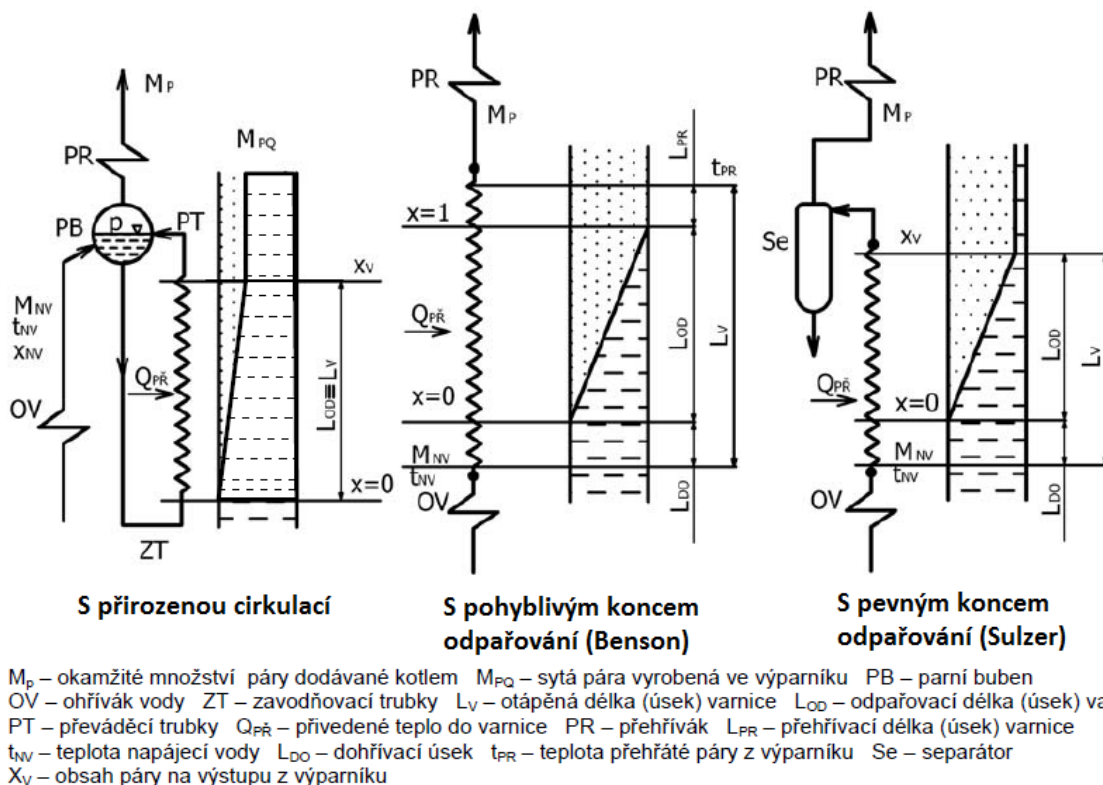
Se šikmým vzájemným proudem – směry proudů látek vzájemně svírají úhel jiný než pravý

Vícenásobné proudění – může být jak souproudé, protiproudé tak křížové vyznačuje se tím, že jedna z látek ve výměníku opakovaně změní směr

Výparníky

Výparník je energetické zařízení, ve kterém se z přivedené vody (obvykle z ohříváku vody) vyrobí sytá pára. Základním prvkem výparníku je varnice, která přijímá teplo z teplejšího média a kde se odpařuje voda. Hlavní funkcí kterou má výparník plnit je tedy výroba technicky čisté, syté páry. Jsou dva základní typy výparníků u vodotrubných zařízení. Výparník s přirozenou cirkulací (bubnové kotle) a výparníky průtočné, které jsou

provedeny jako **průtočný výparník s pohyblivým koncem odpařování** (Benson) a průtočný výparník s pevným koncem odpařování (Sulzer). Typy výparníků jsou zobrazeny na obr 9. Následující popis výparníků je zpracován dle literatury [6].



Obr. 9 Typy výparníků [6]

Výparník s přirozenou cirkulací

sestává z parního bubnu, v němž se odlučuje voda od páry a do něhož se přivádí napájecí voda z ohříváku vody. Z vodního prostoru bubnu se voda (na bodu varu) vede systémem zavodňovacích trubek do otápěných varnic o délce L_v . Pokud na vstupu do varnice má voda teplotu saturace, pak délka varnice L_v je totožná s odpařovací délkou L_{od} . Ve varnici se část vody odpaří, takže na výstupu z varnice vystupuje vždy parovodní směs – tedy směs vody a syté páry na bodu varu – charakterizovaná suchostí x_v (obsah syté páry v 1 kg parovodní směsi), jejíž hodnota je v tomto případě vždy menší než jedna. Parovodní směs z varnic se pak vede systémem převáděcích trubek zpátky do parního bubnu, v němž se oddělí voda od páry. Sytá pára se pak odvádí z bubnu do přehříváku páry.

Výparník průtočný s pohyblivým koncem odpařování (Benson)

je tvořen soustavou paralelních varnic (nemá parní buben), které jsou na vstupu (i výstupu) připojeny ke společné rozdělovací (a sběrné) komoře, takže tlak na vstupu i na výstupu ve všech varnicích je stejný. Do výparníku vstupuje voda z ohříváku vody, který je vždy konstruován tak, aby teplota vody t_{NV} byla nižší, než je teplota varu vody. Na otápěné délce varnice L_V lze vymezit tři úseky:

- dohřívací úsek L_{DO} - v této části varnice se přivedená voda dohřeje z teploty t_{NV}

na teplotu varu t' , suchost v tomto místě je $x = 0$;

- odpařovací úsek L_{OD} - v této části proběhne odpaření veškeré vody na sytou páru,

suchost $x = 1$;

- přehřívací úsek L_{PR} - v této části se sytá pára přehřívá na teplotu t_{PR} , která je např.

o 15 °C vyšší než je teplota sytosti.

Na výstupu z tohoto výparníku je vždy mírně přehřátá pára, která se pak vede do přehříváku páry PR.

Výparník průtočný s pevným koncem odpařování (Sulzer)

sestává ze soustavy paralelních varnic (podobně jako Benson) a ze separátoru v němž se odlučuje voda od páry. Do výparníku vstupuje voda z ohříváku vody, která má opět teplotu nižší než je teplota varu. Otápěnou délku varnice L_V lze rozdělit na část dohřívací L_{DO} , v níž se voda ohřeje na teplotu varu (t' ; $x = 0$) a na část odpařovací L_{OD} , v níž se odpaří takřka veškerá voda, takže z varnice vystupuje parovodní směs s vysokou suchostí, např. $x_V = 0,95$. V separátoru se voda odloučí a vrací se zpět do okruhu (např. do úpravy vody), odloučená pára se vede do přehříváku páry. Na výstupu z varnic u tohoto výparníku je vždy parovodní směs s vysokou suchostí.

Mnou navrhovaný průtočný parogenerátor je výparníkem typu BENSON (průtočný s pohyblivým koncem odpařování), který je proveden z jedné trubky stočené ve spirále. Spirála je uložena v tlakové, válcové nádobě, ve které proudí tlakový vzduch z kompresoru.

3. Vlastnosti vlhkého vzduchu, vody, vodní páry a parovodní směsi

V každém energetickém oběhu, nebo zařízení, ať už při konstruování nebo provozu, je nutné znát základní vlastnosti pracovních médií, které přenáší tepelnou energii. A to zejména spaliny, vody, vodní páry, pvs a vzduchu pro konstrukci zařízení. Jelikož v mém zařízení (PPG) dochází k ohřevu vody horkým vzduchem z kompresoru a jejímu vypaření, popisuji v této kapitole vlastnosti vody, vodní páry, vlhkého vzduchu a parovodní směsi. Tato kapitola byla vypracována dle literatury [2]

3.1 Vlhký vzduch

Atmosférický vzduch nasávaný kompresorem, je vlhký vzduch, tj. směs suchého vzduchu a vodní páry. Vodní pára ve vzduchu je nejčastěji ve stavu přehřátém, protože při běžných vlhkostech a obvyklém tlaku vzduchu $p_0 = 0,1 \text{ Mpa}$ je poměrný obsah vodních par $o_p = V_p/V_c \text{ (m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$ nízký a tudíž při odpovídajícím nízkém parciálním tlaku

$$p_p = \frac{V_p}{V_c} \cdot p_c = o_p p_c \text{ [Mpa]} \quad (\text{rce 3.1.1})$$

bude i bod varu a tedy i teplota kondenzace $t' = t''$ nízká, obvykle nižší než teplota vzduchu t_v , která je shodná s teplotou páry t_p obsažené ve vlhkém vzduchu ($t_p = t_v > t''$).

Celkový tlak vlhkého vzduchu je dán součtem parciálního tlaku suchého vzduchu p_{vs} s parciálním tlakem vodní páry p_p ve vzduchu,

$$p_c = p_{vs} + p_p = \sum p_i + p_p = \sum o_i p_c + o_p p_c \quad (\text{rce 3.1.2})$$

vlhkost vzduchu

Teplota vodních par ve vzduchu při určitém parciálním tlaku p_p je vždy libovolně vyšší než teplota syté páry t'' pro daný p_p , podle toho, jak je vzduch ohřátý. Avšak nemůže nikdy být nižší, než t'' , poněvadž by docházelo ke kondenzaci, která by probíhala tak dlouho, než by obsah vodních par klesl na hodnotu odpovídající tlaku syté páry p'' pro danou teplotu $t_v = t''$.

relativní vlhkost vzduchu

Hmotnost vlhkosti obsažené v 1 m³ vlhkého vzduchu se nazývá absolutní vlhkost m_p (g·m⁻³) a číselně odpovídá hustotě páry ρ_p (g·m⁻³). Hodnota $m_{pmax}=p''$ při dané teplotě vzduchu. S rostoucí teplotou vzduchu roste p'' a tudíž roste i ρ'' . Určitý stav vlhkosti vzduchu se obvykle vyjadřuje tzv. relativní vlhkosti vzduchu φ , je to podíl skutečné absolutní vlhkosti ρ_p , a maximální možné absolutní vlhkosti ρ'' při dané teplotě vzduchu

$$\varphi = \frac{\rho_p}{\rho''} = \frac{p_p}{p''} \quad (\text{rce 3.1.3})$$

(pro suchý vzduch $\varphi=0$ a pro vzduch nasycený vodními parami $\varphi=1$.)

měrná vlhkost

vzduchu je poměr hmotnosti vodní páry ve vzduchu ρ_p ku hmotnosti suchého vzduchu ρ_{vs} ,

$$x_v = \frac{m_p}{m_{vs}} = \frac{\rho_p}{\rho_{vs}} \quad [kg \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rce 3.1.4})$$

Vlhký vzduch o měrné vlhkosti x a hmotnosti suchého vzduchu 1kg má tedy hmotnost $m_{vv}=x_v+1$ (kg). Ze stavové rovnice tedy

$$x_v = \frac{R_v}{R_p} \cdot \frac{p_p}{p_v} = 0,622 \cdot \frac{p_p}{p_v} = 0,622 \cdot \frac{p_p}{p_c - p_p} \quad (\text{rce 3.1.5})$$

Protože pro vzduch nasycený parami je měrná vlhkost vzduchu

$$x_v'' = 0,622 \cdot \frac{p''}{p_c - p''} \quad [kg \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rce 3.1.6})$$

platí totéž pro relativní vlhkost

$$x_v = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p''}{p_c - \varphi \cdot p''} \quad [kg \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rce 3.1.7})$$

Z rovnice plyne, že při změně tlaku vzduchu z p_{c1} na p_{c2} se změní relativní vlhkost v poměru

$$\frac{\varphi_1}{\varphi_2} = \frac{p_{c1}}{p_{c2}} \quad (\text{rce 3.1.8})$$

Poměrný objem vodní páry připadající na 1 m³ suchého vzduchu při dané teplotě t_v a relativní vlhkosti φ lze vyjádřit výrazem

$$o_p = \frac{\varphi \cdot \rho''}{p_c - \varphi \cdot p''} \quad (\text{rce 3.1.9})$$

takže celkový **objem vlhkého vzduchu**

$$V_{vv} = V_{vs} \cdot x_v = V_{vs} (1 + o_p) [m^3] \quad (\text{rce 3.1.10})$$

poměrné zvětšení objemu vlhkého vzduchu proti suchému

$$x_v = 1 + \frac{\varphi \cdot \rho''}{p_c - \varphi \cdot p''} \doteq 1 + \frac{\varphi \cdot \rho''}{p_c - p''} [m^3 \cdot m^{-3}] \quad (\text{rce 3.1.11})$$

Hustota vlhkého vzduchu ρ_{vv} je dána součtem ρ_{vs} a ρ_p . Je-li určen stav vlhkého vzduchu p_c a T_v a φ , lze získat vztah

$$\rho_{vv} = \rho_{vs} + \rho_p = \frac{p_c \cdot (1+x)}{47,06 T \cdot (0,622+x)} [kg \cdot m^{-3}] \quad (\text{rce 3.1.12})$$

3.2. Voda a vodní pára, pvs

Vodní pára

Vodní pára vzniká přivedením tepla přiváděné vodě a je nejčastěji produkována v parních kotlích, jako nositel tepelné a tlakové energie slouží jednak k výrobě mechanické, resp. elektrické energie v elektrárnách. Sytá vodní pára je plynná fáze vody ve stavu nasycení při daném tlaku, chová se jako reálný plyn. V energetickém oběhu se vyskytuje pára mokrá, sytá a přehřátá. Mokrá pára je směs vody na bodu varu při daném tlaku a syté páry při tomtéž tlaku, a to v určitém poměru daném poměrnou vlhkostí $(1-x)(kg \cdot kg^{-1})$ respektive suchostí $x(-)$. Sytá pára je pára bez vlhkosti (tj. $1-x=0$, resp. $x=1$), jejíž teplota t'' se rovná bodu varu t' při daném tlaku. Přitom platí

$$t'' = t' \doteq 100 \cdot \sqrt[4]{10p} \quad [^{\circ}C] \quad (\text{rce 3.2.1})$$

přehřátá pára je pára o daném tlaku p a o teplotě t_p vyšší, nežli t'' , resp. t' při témže tlaku, tj. $t_p > t'' = t'$.

Podle použití musí mít technická pára jednak určité termodynamické vlastnosti (tlak a teplotu), jednak potřebnou čistotu, popř. další vlastnosti.

termodynamické vlastnosti vody a vodní páry

Jsou definovány řadou fyzikálních veličin, které lze rozdělit na stavové a tepelné veličiny. Stavové veličiny, mezi něž patří teplota ($^{\circ}\text{C}$), resp. $T(\text{K})$, tlak p (MPa), měrný objem v ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$), resp. hustota $\rho = 1/v$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) a u mokré páry též suchost x ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$), jsou důležité pro stanovení průtočných průřezů, tlakových ztrát, pevnostní výpočty jednotlivých tlakových částí a i pro výpočty přenosu tepla a hmot do výhřevných ploch. Stavové veličiny popisují také dynamickou viskozitu η důležitou pro proudění a teplotní roztažnost α_t . Tepelné veličiny, z nich nejdůležitější jsou měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku c_p , resp konstantního objemu c_v ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), entalpie i ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$), entropie s ($\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$) a tepelná vodivost λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), se používají ke stanovení součinitelů přestupu tepla a slouží pro navrhování teplosměnných ploch.

Voda a sytá pára, která je v termodynamické rovnováze, tj. směs vody na bodu varu a páry na mezi sytosti pro daný tlak, se nazývá mokrá pára. Tvoří dvoufázovou jednosložkovou soustavu, takže tlak a teplota bodu varu, resp. sytosti jsou na sobě navzájem závislé podle rovnice (3.2.1). Stav mokré páry nelze tedy popsat současně teplotou a tlakem, ale musí se popsat ještě hodnotou suchosti x , která udává obsah syté páry ve směsi 1 kg mokré páry. Zbytek $1-x$ tzv. vlhkost páry, udává obsah vody v soustavě. Tepelné i stavové veličiny c_p , i , λ , v , q i viskozity η se pro stav udaný suchostí x určují jako součet x -násobku příslušné veličiny syté páry a $(1-x)$ -násobku příslušné veličiny pro vodu na bodu varu. Například je-li na mezi sytosti pro daný tlak entalpie syté páry i'' a vody na bodu varu i' , pak entalpie mokré páry bude:

$$i_x = x i'' + (1 - x) \cdot i' = i' + x \cdot (i'' - i') = i' + x r \quad (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (\text{rce 3.2.2})$$

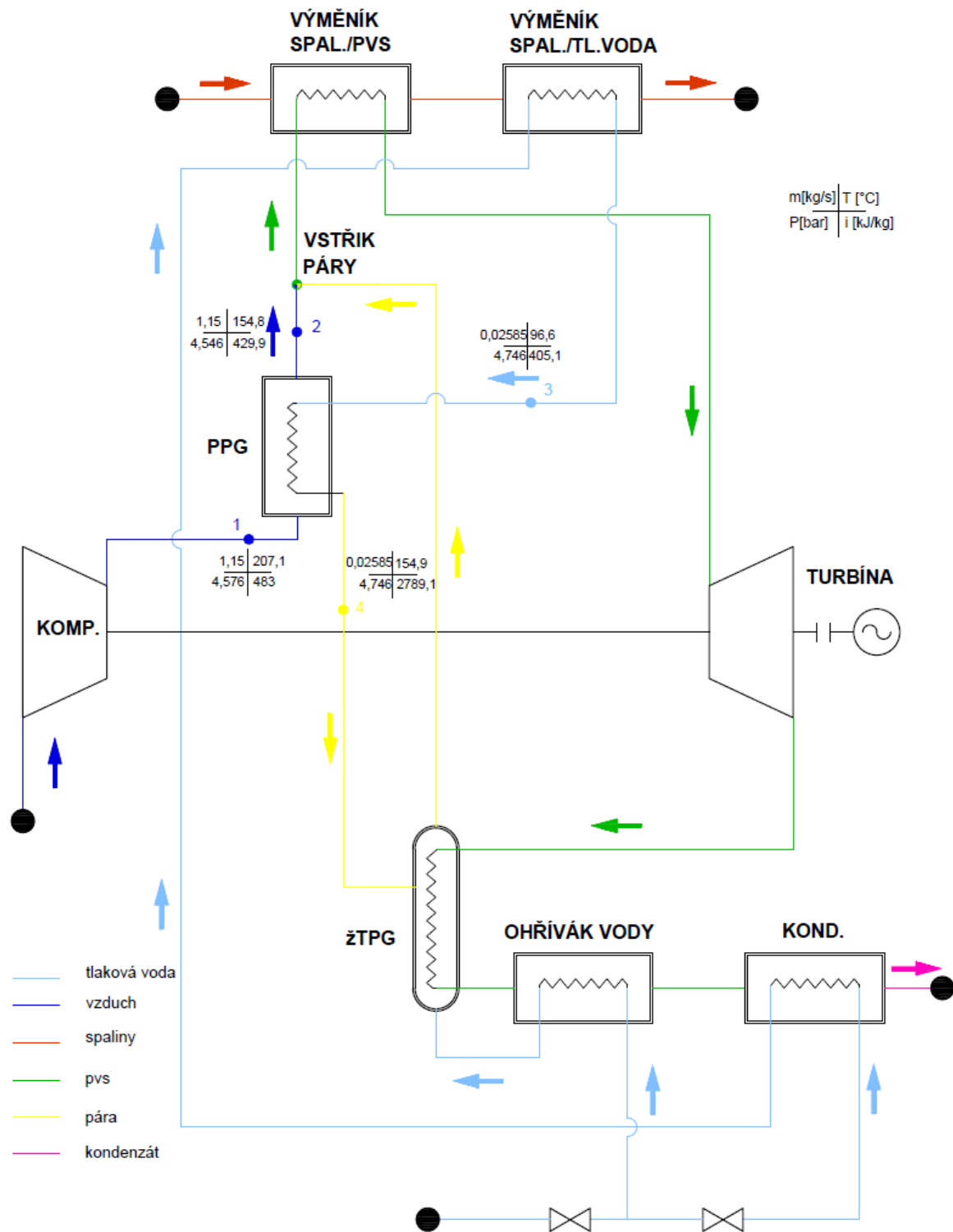
Rozdíl entalpií $i'' - i' = r$ je tzv. výparné teplo syté páry. Obdobné vztahy lze použít i pro další veličiny, např. pro měrný objem

$$v_x = x v'' + (1 - x) \cdot v' \quad (\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (\text{rce 3.2.3})$$

$$\frac{1}{\rho_x} = x \cdot \frac{1}{\rho''} + (1 - x) \cdot \frac{1}{\rho'} \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (\text{rce 3.2.4})$$

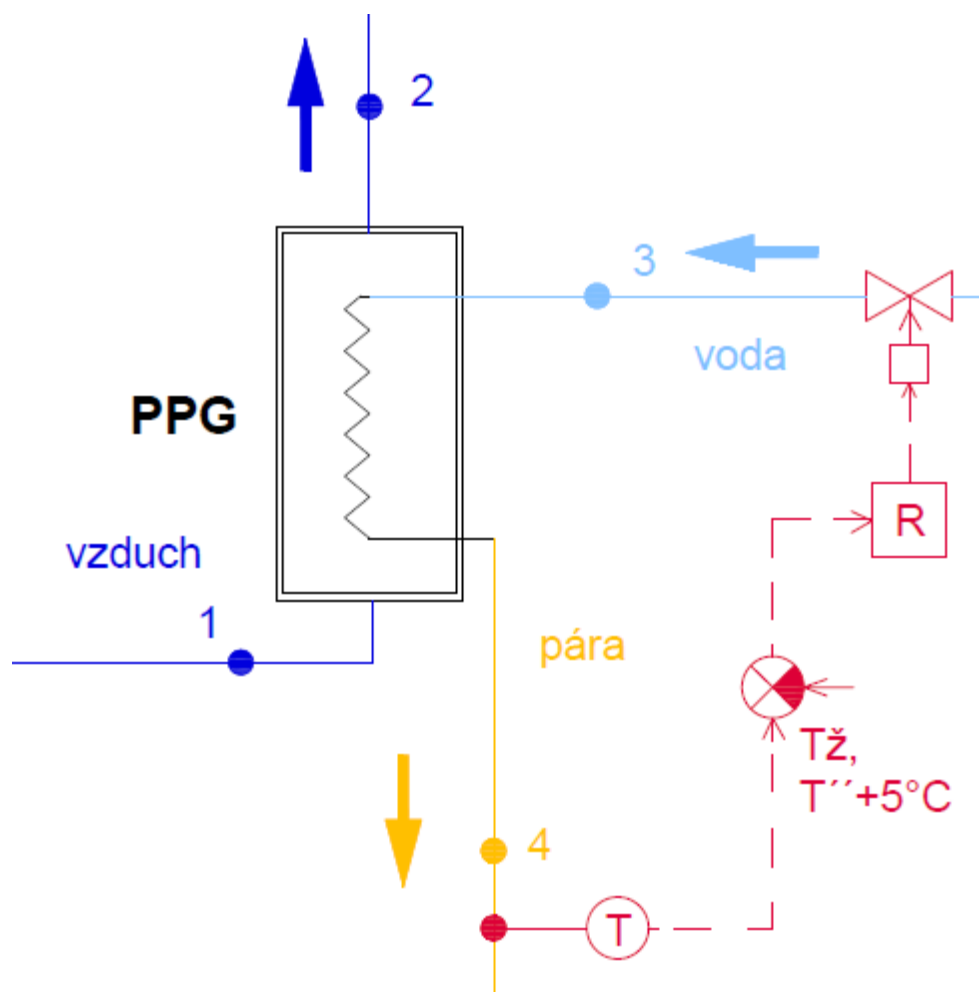
K zobrazení parních tepelných oběhů nejčastěji používáme tepelné diagramy páry a to T - s (teplota - entropie) nebo i - s (entalpie - entropie). Ze těchto diagramů lze odečíst hodnoty potřebných veličin pro dané stavové veličiny (nejčastěji p , t nebo u mokré páry p , x) a to plynule v celém rozsahu, zatímco v tabulkách často musíme mezi vyšší a nižší hodnotou provádět interpolaci.

4. Schéma zařízení FLEXIVIT s průtočným generátorem páry



Obr. 10 Schéma zařízení s parametrovými kříži pro vstup a výstup do PPG, ŽTPG(žárotrubný parní generátor), PPG(průtočný parogenerátor), KOND.(kondenzátor)

5. Schéma regulace průtočného generátoru páry



Obr. 11 Schéma regulace průtočného generátoru páry. T - regulovaná výstupní veličina (teplota), T_ž - žádaná teplota, R - regulátor teploty

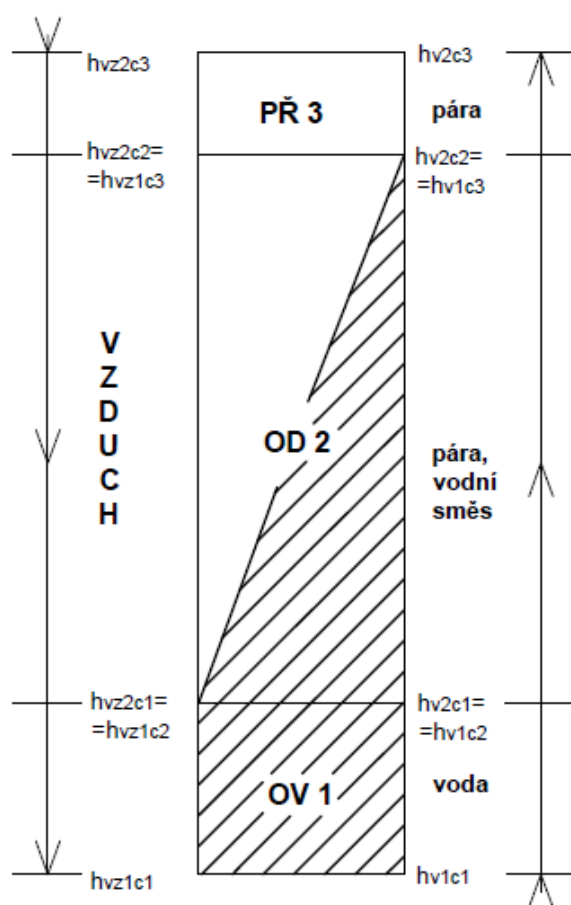
U průtočného generátoru páry musíme zajistit, aby na výstupu ze zařízení byla vždy minimální teplota přehřáté páry alespoň $T'' + 5^{\circ}\text{C}$. Pokud teplota za PPG klesne pod minimální žádanou teplotu, tak regulační obvod sníží přiváděné množství vody do zařízení.

Tomuto způsobu regulace odpovídá i mnou zvolená konstrukce PP. Je proveden jako 1-trubkový výparník typu BENSON s pohyblivým koncem odpařování.

6. Tepelný výpočet PPG

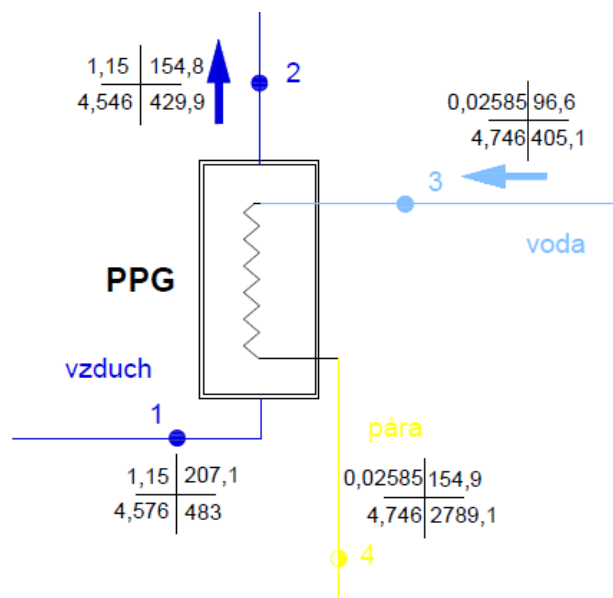
V této kapitole je sepsán postup výpočtu průtočného generátoru páry, jehož cílem je zajistit ideální podmínky pro ohřev pracovního média (vody) pro vytvoření páry, která je v systému FLEXIVIT dále použita pro další účely. Snahou je zajistit co největší přestupy tepla a zjistit tak optimální teplosměnnou plochu PPG a rozměry jednotlivých částí. Tyto výpočty jsou zpracovány na základě literatury [1;2]

Jelikož PPG je výparník, rozdělil jsem varnici na 3 dílčí oblasti (obr. 12), kdy v každé části dochází k odlišným fyzikálním procesům a je tedy nutno přistupovat k těmto oblastem jednotlivě. Před samotným výpočtem jsem si navrhl předpokládané rozměry tlakové nádoby, které jsem později "opravil" v závislosti na dosažených výsledcích a také jsem uvažoval vinutí trubek, v kterých proudí voda, následně parovodní směs, jako vinutí do spirály, kvůli zvýšení prostupu tepla a menší velikosti zařízení.



Obr. 12 Rozdělení varnice PPG na 3 oblasti. OV 1 - Ohřívací část pro ohřev vody, OD 2 - Odpařovací část, kde dochází k varu a změně fáze, PŘ 3 - Přehřívací část pro dosažení mírně přehřáté páry na výstupu

Vstupní a výstupní parametry potřebné k tepelným výpočtům jednotlivých oblastí jsou znázorněny na obrázku (obr.13) Na konci této kapitoly je v (tabulce) přehled všech veličin vypočtených na základě výpočtového programu EES , potřebných k dosažení do výpočtů zde uvedených.



Obr. 13 Schéma vstupních a výstupních hodnot vzduchu, vody a páry v PPG

6.1 Tepelná bilance výparníku:

Entalpie jsou stanoveny ve výpočtovém programu EES, h [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$].

Pro oblast ohřívací OV 1:

$$Q_1 = m_{vz} \cdot (h_{vz1c1} - h_{vz2c1}) = m_v \cdot (h_{v1c1} - h_{v2c1}) \text{ [kW]} \quad (\text{rce 6.1.1})$$

$$Q_1 = 1,15 \cdot (435,2 - 430,1) = 0,02585 \cdot (631,7 - 405,1)$$

$$Q_1 = 5,856 \text{ [kW]}$$

Pro oblast odpařovací OD 2:

$$Q_2 = m_{vz} \cdot (h_{vz1c2} - h_{vz2c2}) = m_v \cdot (h_{v1c2} - h_{v2c2}) \text{ [kW]} \quad (\text{rce 6.1.2})$$

$$Q_2 = 1,15 \cdot (482,7 - 435,2) = 0,02585 \cdot (2746 - 631,7)$$

$$Q_2 = 54,65 \text{ [kW]}$$

Pro oblast přehřívací PŘ 3:

$$Q_3 = m_{vz} \cdot (h_{vz1c3} - h_{vz2c3}) = m_v \cdot (h_{v1c3} - h_{v2c3}) \text{ [kW]} \quad (\text{rce 6.1.3})$$

$$Q_3 = 1,15 \cdot (483 - 482,7) = 0,02585 \cdot (2758 - 2746)$$

$$Q_3 = 0,3048 \text{ [kW]}$$

6.2 Stanovení teplot na vstupu/výstupu v oblasti OD 2:

Pro stanovení hledaných teplot v oblasti OD2 bylo použito funkcí pro entalpii v programu EES a to z výpočtů tepelných bilancí PPG.

teploty vzduchu

$$h_{vz2_c1} = \text{Enthalpy}(\text{Air_ha}; T=t_{vz1_c1}; P=P1)$$

$$h_{vz2_c2} = \text{Enthalpy}(\text{Air_ha}; T=t_{vz1_c2}; P=P2)$$

$$h_{vz2_c3} = \text{Enthalpy}(\text{Air_ha}; T=t_{vz1_c3}; P=P2)$$

$$t_{vz1c1} = 155,5 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$t_{vz1c2} = 160,5 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

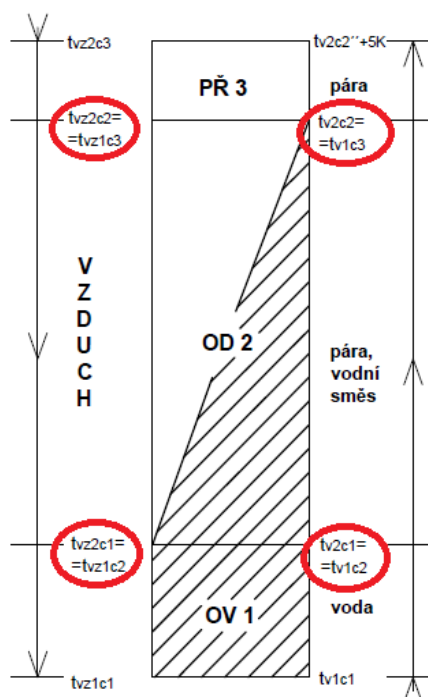
$$t_{vz1c3} = 206,8 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

saturační teplota vody

Jelikož na výstupu požadují přehřátou páru $T''+5K$, stanovím saturační teplotu vody

$$T_{\text{sat}} = T_{\text{sat}}(\text{Steam_IAPWS}; P=P3)$$

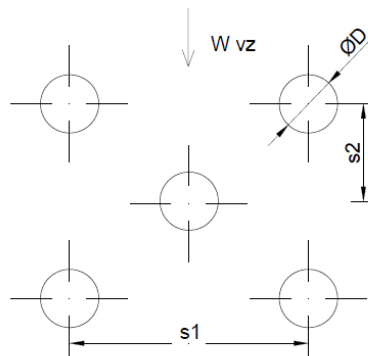
$$t_{\text{sat}} = 149,9 \text{ [}^\circ\text{C]}$$



Obr. 14 Hledané teploty v oblasti OD 2

6.3 Součinitele přestupu tepla na straně vzduchu:

Při stanovení součinitele přestupu tepla je nutné zohlednit geometrii a způsob obtékání plochy. Ze strany vzduchu počítám přestup tepla jako příčné obtékání svazku trubek uspořádaných za sebou. Viz (obr. 15)



Obr. 15 Trubky vystřídane

Pro všechny oblasti volím dle lit.[1]světlý průřez kanálu $F=0,04006 \text{ [m}^2\text{]}$, korekční součinitel $C_z=1 \text{ [-]}$, dále korekční součinitel C_s , který se určí v závislosti na poměrné příčné rozteči trubek $\sigma_1 = s_1/D$ a parametru $\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1-1}{\sigma_2-1}$, kde $\sigma_2' = \sqrt{0,25 \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2}$ je poměrná úhlopříčná rozteč, poté platí:

$$C_s = 0,34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} \quad (\text{rce 6.3.1})$$

$$C_s = 0,358 \text{ [-]}$$

Pro oblast ohřívací OV 1:

Výpočet středního objemového toku

$$V_{vz1} = \frac{m_{vz}}{\rho_{vz1}} \text{ [m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}\text{]} \quad (\text{rce 6.3.2})$$

$$V_{vz1} = \frac{1,15}{3,679}$$

$$V_{vz1} = 0,3126 [m_n^3 \cdot kg^{-1}]$$

Výpočet střední rychlosti

$$w_{vz1} = \left(\frac{V_{vz1}}{F} \right) \cdot \left(\frac{273,15 + t_{vz1_stř}}{273,15} \right) [m \cdot s^{-1}] \quad (\text{rce 6.3.3})$$

$$w_{vz1} = \left(\frac{0,3126}{0,04006} \right) \cdot \left(\frac{273,15 + 158}{273,15} \right)$$

$$w_{vz1} = 12,32 [m \cdot s^{-1}]$$

Výpočet součinitele přestupu tepla

$$\alpha_{vz1} = C_z \cdot C_s \cdot \left(\frac{\lambda_{vz1}}{D} \right) \cdot \left(\frac{w_{vz1} \cdot D}{\nu_{vz1}} \right)^{0,6} \cdot Pr_{vz1}^{0,33} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (\text{rce 6.3.4})$$

$$\alpha_{vz1} = 1 \cdot 0,358 \cdot \left(\frac{0,0356}{0,025} \right) \cdot \left(\frac{12,32 \cdot 0,025}{0,000006631} \right)^{0,6} \cdot 0,6998^{0,33}$$

$$\alpha_{vz1} = 286 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Pro oblast odpařovací OD 2:

Výpočet středního objemového toku

$$V_{vz2} = \frac{m_{vz}}{\rho_{vz2}} [m_n^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rce 6.3.5})$$

$$V_{vz2} = \frac{1,15}{3,472}$$

$$V_{vz2} = 0,3312 [m_n^3 \cdot kg^{-1}]$$

Výpočet střední rychlosti

$$w_{vz2} = \left(\frac{V_{vz2}}{F} \right) \cdot \left(\frac{273,15 + t_{vz2_stř}}{273} \right) [m \cdot s^{-1}] \quad (\text{rce 6.3.6})$$

$$w_{vz2} = \left(\frac{0,3312}{0,04006} \right) \cdot \left(\frac{273,15 + 183,65}{273} \right)$$

$$w_{vz2} = 13,83 [m \cdot s^{-1}]$$

Výpočet součinitele přestupu tepla

$$\alpha_{vz2} = C_z \cdot C_s \cdot \left(\frac{\lambda_{vz2}}{D} \right) \cdot \left(\frac{w_{vz2} \cdot D}{\nu_{vz2}} \right)^{0,6} \cdot Pr_{vz2}^{0,33} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (\text{rce 6.3.7})$$

$$\alpha_{vz2} = 1 \cdot 0,358 \cdot \left(\frac{0,03727}{0,025} \right) \cdot \left(\frac{13,83 \cdot 0,025}{0,000007325} \right)^{0,6} \cdot 0,6994^{0,33}$$

$$\alpha_{vz2} = 302,3 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Pro oblast přehřívací PŘ 3:

Výpočet středního objemového toku

$$V_{vz3} = \frac{m_{vz}}{\rho_{vz3}} [m_n^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rce 6.3.8})$$

$$V_{vz3} = \frac{1,15}{3,303}$$

$$V_{vz3} = 0,3482 [m_n^3 \cdot kg^{-1}]$$

Výpočet střední rychlosti

$$w_{vz3} = \left(\frac{V_{vz3}}{F} \right) \cdot \left(\frac{273,15 + t_{vz3_stř}}{273} \right) [m \cdot s^{-1}] \quad (\text{rce 6.3.9})$$

$$w_{vz3} = \left(\frac{0,3482}{0,04006} \right) \cdot \left(\frac{273,15 + 206,95}{273} \right)$$

$$w_{vz3} = 15,28 [m \cdot s^{-1}]$$

Výpočet součinitele přestupu tepla

$$\alpha_{vz3} = C_z \cdot C_s \cdot \left(\frac{\lambda_{vz3}}{D} \right) \cdot \left(\frac{w_{vz3} \cdot D}{\nu_{vz3}} \right)^{0,6} \cdot Pr_{vz3}^{0,33} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (\text{rce 6.3.10})$$

$$\alpha_{vz3} = 1 \cdot 0,358 \cdot \left(\frac{0,03876}{0,025} \right) \cdot \left(\frac{15,28 \cdot 0,025}{0,000007979} \right)^{0,6} \cdot 0,6994^{0,33}$$

$$\alpha_{vz3} = 317 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

6.4 Součinitele přestupu tepla vody, páry a pvs:

Při stanovení součinitele přestupu tepla, je nutné zohlednit geometrii a způsob obtékání plochy. Ze strany vody a přehřáté páry (tedy pro oblast OV1 a PŘ3) počítám přestup tepla jako podélné obtékání plochy. Kdy lze podle lit. [1] na základě zkušeností z praxe lze v mém případě zanedbat opravné koeficienty C_t , C_l , a C_m a nahradit je 1.

V oblasti OD 2 dochází k intenzivnímu vypařování vody, tedy ke změně fáze a je tedy volit jiný typ výpočtu. (6.4.5)

Pro všechny oblasti však lze pro trubku Ø25x2 určit průtočný průřez

$$S_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} [m^2] \quad (\text{rce 6.4.1})$$

$$S_p = \frac{\pi \cdot 0,021^2}{4}$$

$$S_p = 0,0003464 [m^2]$$

Pro oblast ohřívací OV 1:

Výpočet středního objemového toku

$$V_{v1} = \frac{m_{vz}}{\rho_{v1}} [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (\text{rce 6.4.2})$$

$$V_{v1} = \frac{0,02585}{481,7}$$

$$V_{v1} = 0,00005366 [m^3 \cdot s^{-1}]$$

Výpočet střední rychlosti

$$w_{v1} = \frac{V_{v1}}{S_p} [m \cdot s^{-1}] \quad (\text{rce 6.4.3})$$

$$w_{v1} = \frac{0,00005366}{0,0003464}$$

$$w_{v1} = 0,1549 [m \cdot s^{-1}]$$

Výpočet součinitele přestupu tepla

$$\alpha_{v1} = 0,023 \cdot \left(\frac{\lambda_{v1}}{d}\right) \cdot \left(\frac{w_{v1} \cdot d}{\nu_{v1}}\right)^{0,8} \cdot Pr_{v1}^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_m [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (\text{rce 6.4.4})$$

$$\alpha_{v1} = 0,023 \cdot \left(\frac{0,6836}{0,021}\right) \cdot \left(\frac{0,1549 \cdot 0,021}{4,682 \cdot 10^{-7}}\right)^{0,8} \cdot 1,402^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_{v1} = 1015 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Pro oblast odpařovací OD 2:

Výpočet součinitele přestupu tepla

$$\alpha_{v2} = 145 \cdot (t_{steny} - t_{media})^{2,33} \cdot p_v^{0,5} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (\text{rce 6.4.5})$$

$$\alpha_{v1} = 145 \cdot (151,4 - 149,9)^{2,33} \cdot 4,746^{0,5}$$

$$\alpha_{v1} = 812,5 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Pro oblast přehřívací PŘ 3:

Výpočet středního objemového toku

$$V_{v3} = \frac{m_{vz}}{\rho_{v3}} [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (\text{rce 6.4.6})$$

$$V_{v3} = \frac{0,02585}{2,522}$$

$$V_{v3} = 0,01025 [m^3 \cdot s^{-1}]$$

Výpočet střední rychlosti

$$w_{v3} = \frac{V_{v3}}{S_p} [m \cdot s^{-1}] \quad (\text{rce 6.4.7})$$

$$w_{v3} = \frac{0,01025}{0,0003464}$$

$$w_{v3} = 29,59 [m \cdot s^{-1}]$$

Výpočet součinitele přestupu tepla

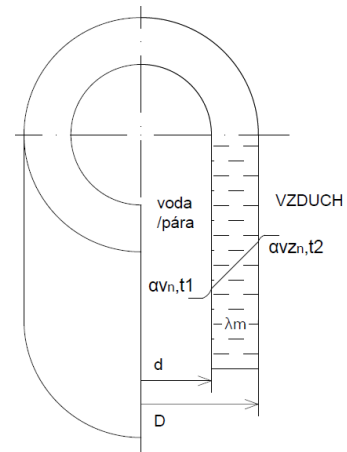
$$\alpha_{v3} = 0,023 \cdot \left(\frac{\lambda_{v3}}{d}\right) \cdot \left(\frac{w_{v3} \cdot d}{\nu_{v3}}\right)^{0,8} \cdot Pr_{v3}^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_m [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (\text{rce 6.4.8})$$

$$\alpha_{v3} = 0,023 \cdot \left(\frac{0,0317}{0,021}\right) \cdot \left(\frac{29,59 \cdot 0,021}{0,000005588}\right)^{0,8} \cdot 1,049^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_{v3} = 385,3 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

6.5 Součinitele prostupu tepla výparníku

Vzorec pro výpočet prostupu tepla pro válcovou stěnu (trubku $\varnothing 25 \times 2$) u výparníku je zjednodušen, nepočítám zde se zašpiněním trubek a nánosy na trubkách, protože se nejedná o spaliny, ale vodu, často demineralizovanou. $\lambda_m = 47 [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$ pro ocelové trubky.



Pro oblast ohřívací OV 1:

$$k_1 = \frac{\frac{1}{\frac{1}{\alpha_{v1} \cdot d} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_m} \cdot \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{\alpha_{vz1} \cdot D}}}{\frac{1}{0,025}} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (\text{rce 6.5.1})$$

$$k_1 = \frac{\frac{1}{0,025}}{\frac{1}{1015 \cdot 0,021} + \frac{1}{2 \cdot 47} \cdot \ln \frac{0,025}{0,021} + \frac{1}{286 \cdot 0,025}}$$

$$k_1 = 212,1 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Pro oblast odpařovací OD 2:

$$k_2 = \frac{\frac{1}{\frac{1}{\alpha_{v2} \cdot d} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_m} \cdot \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{\alpha_{vz2} \cdot D}}}{\frac{1}{0,025}} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (\text{rce 6.5.2})$$

$$k_2 = \frac{\frac{1}{0,025}}{\frac{1}{812,5 \cdot 0,021} + \frac{1}{2 \cdot 47} \cdot \ln \frac{0,025}{0,021} + \frac{1}{302,3 \cdot 0,025}}$$

$$k_2 = 207,5 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Pro oblast přehřívací PŘ 3:

$$k_3 = \frac{\frac{1}{\frac{1}{\alpha_{v3} \cdot d} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_m} \cdot \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{\alpha_{vz3} \cdot D}}}{\frac{1}{0,025}} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (\text{rce 6.5.1})$$

Obr. 16 Válcová stěna pro $\varnothing 25 \times 2$

$$k_3 = \frac{\frac{1}{0,025}}{\frac{1}{385,3 \cdot 0,021} + \frac{1}{2 \cdot 47} \cdot \ln \frac{0,025}{0,021} + \frac{1}{317 \cdot 0,025}}$$

$$k_3 = 159 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

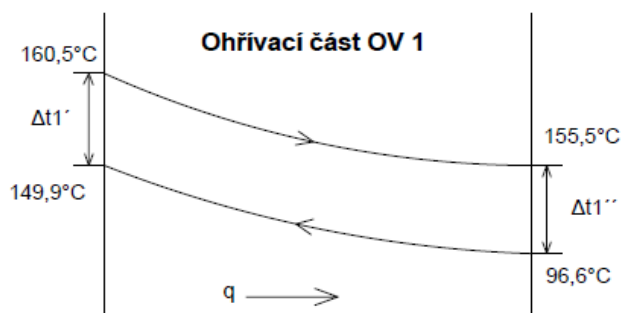
6.6 Výpočet středního logaritmického spádu (protiproud)

Pro oblast ohřivací OV 1:

$$\Delta t_{log 1} = \frac{\Delta t_1' - \Delta t_1''}{\ln \frac{\Delta t_1'}{\Delta t_1''}} [^{\circ}C] \quad (\text{rce 6.6.1})$$

$$\Delta t_{log 1} = \frac{10,6 - 58,9}{\ln \frac{10,6}{58,9}}$$

$$\Delta t_{log 1} = 28,16 [^{\circ}C]$$



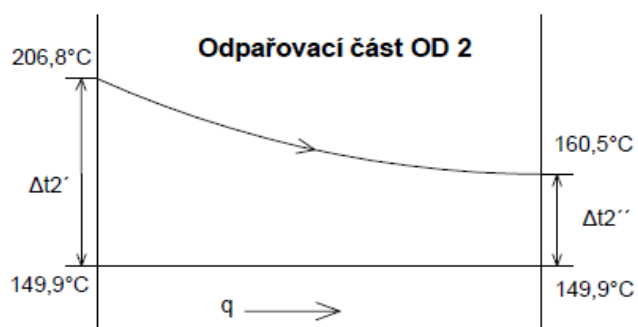
Obr. 17 Střední log. spád pro oblast OV 1

Pro oblast odpařovací OD 2:

$$\Delta t_{log 2} = \frac{\Delta t_2' - \Delta t_2''}{\ln \frac{\Delta t_2'}{\Delta t_2''}} [^{\circ}C] \quad (\text{rce 6.6.2})$$

$$\Delta t_{log 2} = \frac{56,9 - 10,6}{\ln \frac{56,9}{10,6}}$$

$$\Delta t_{log 2} = 27,55 [^{\circ}C]$$



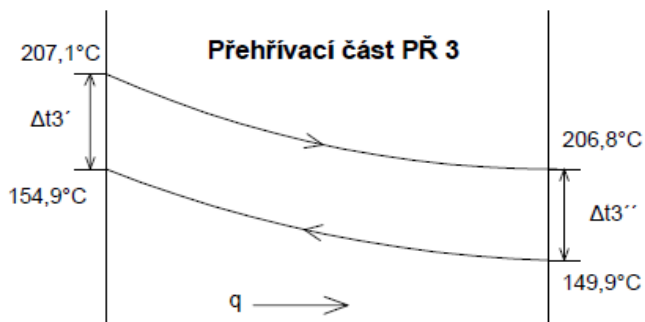
Obr. 18 Střední log. spád pro oblast OD 2

Pro oblast přehřívací PŘ 3:

$$\Delta t_{\log 3} = \frac{\Delta t_3' - \Delta t_3''}{\ln \frac{\Delta t_3'}{\Delta t_3''}} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (\text{rce 6.6.3})$$

$$\Delta t_{\log 3} = \frac{52,2 - 56,9}{\ln \frac{52,2}{56,9}}$$

$$\Delta t_{\log 3} = 54,52 \text{ [}^\circ\text{C]}$$



Obr. 19 Střední log. spád pro oblast PŘ 3

6.7 Celková teplosměnná plocha pro výparník

Pro oblast ohřívací OV 1:

$$S_{c1} = \frac{Q_1 \cdot 1000}{k_1 \cdot \Delta t_{\log 1}} \text{ [m}^2\text{]} \quad (\text{rce 6.7.1})$$

$$S_{c1} = \frac{5,856 \cdot 1000}{212,1 \cdot 28,16} \text{ [m}^2\text{]}$$

$$S_{c1} = 0,9804 \text{ [m}^2\text{]}$$

Pro oblast odpařovací OD 2:

$$S_{c2} = \frac{Q_2 \cdot 1000}{k_2 \cdot \Delta t_{\log 2}} \text{ [m}^2\text{]} \quad (\text{rce 6.7.2})$$

$$S_{c2} = \frac{54,65 \cdot 1000}{207,5 \cdot 27,55} \text{ [m}^2\text{]}$$

$$S_{c2} = 9,56 \text{ [m}^2\text{]}$$

Pro oblast přehřívací PŘ 3:

$$S_{c3} = \frac{Q_3 \cdot 1000}{k_3 \cdot \Delta t_{\log 3}} [m^2] \quad (\text{rce 6.7.3})$$

$$S_{c3} = \frac{0,3048 \cdot 1000}{159 \cdot 54,52} [m^2]$$

$$S_{c3} = 0,03517 [m^2]$$

6.8 Výpočet délky vinutých trubek (vnější povrch)

Pro oblast ohřívací OV 1:

$$L_1 = \frac{S_{c1}}{S_{1m}} [m] \quad (\text{rce 6.8.1})$$

$$L_1 = \frac{0,9804}{\pi \cdot 0,025}$$

$$L_1 = 12,48[m]$$

Pro oblast odpařovací OD 2:

$$L_2 = \frac{S_{c2}}{S_{2m}} [m] \quad (\text{rce 6.8.2})$$

$$L_2 = \frac{9,56}{\pi \cdot 0,025}$$

$$L_2 = 121,7[m]$$

Pro oblast přehřívací PŘ 3:

$$L_3 = \frac{S_{c3}}{S_{3m}} [m] \quad (\text{rce 6.8.3})$$

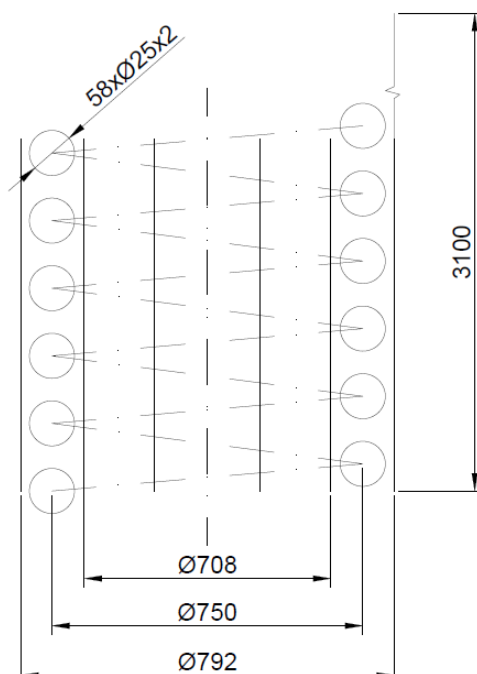
$$L_3 = \frac{0,03517}{\pi \cdot 0,025}$$

$$L_3 = 0,4478[m]$$

6.9 Celková délka vinuté šroubovice

$$L = L_1 + L_2 + L_3 = 12,48 + 121,7 + 0,4478 = 134,63[m] \quad (\text{rce 6.9.1})$$

Na základě zvolených rozměrů tlakové nádoby (viz. příloha A) a obr. 20 a vypočtené celkové délky vinutí šroubovice při zvolené trubce $\varnothing 25 \times 2$, navrhuji v zařízení PPG počet závitů na hodnotě 58 přičemž délka jednoho závitu je cca 2,33 [m],

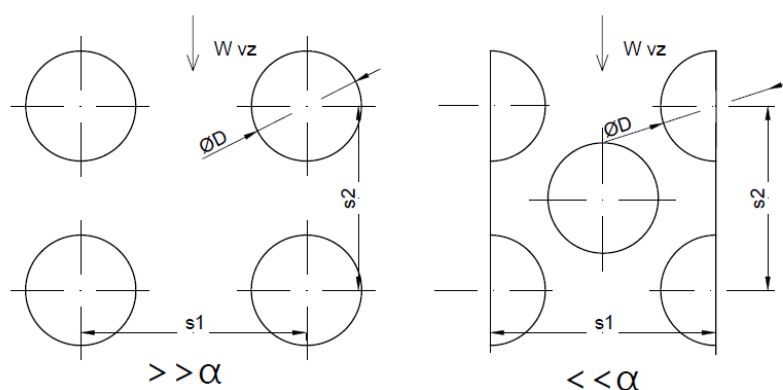


Obr. 20 Vinutí šroubovice

7. Výpočtový projekt PPG a postup výroby

Zařízení PPG je konstrováno jako tlaková nádoba, ve které jsou vinuty teplosměnné trubky ve šroubovici, které omývá tlakový vzduch z kompresoru. Pro zajištění intenzifikace přestupu tepla volím vystřídané uspořádání trubek v kanálu (mezikruží), což se provede tak, že se na vnitřní a vnější stranu kanálu navaří "falešné" poloviny trubek, tak aby se vytvořilo na straně vzduchu příčné obtékání teplosměnných trubek uspořádaných vystřídaně. Provedení je naznačeno v příloženém výkresu (příloha A) viz. detail A.

Dle vypočtené rychlosti vzduchu (12-15 m/s) a pro trubky $\varnothing 25 \times 2$ lze z nomogramu pro součinitel přestupu tepla v literatuře [1] (obr. 7-6 a obr 7-7) odhadnout, že intenzifikace přestupu tepla při příčném obtékání svazku trubek uspořádaných vystřídaně oproti obtékání svazku trubek uspořádaných za sebou (obr. 21), se bude pohybovat kolem 20%.



Obr. 21 Srovnání provedení uspořádání obtékaných trubek za sebou a uspořádání vystřídaně

Výroba šroubovice je zajištěna buď dodavatelem, který disponuje technologií pro výrobu trubnatých šroubovic, nebo ohýbáním každého závitů šroubovice zvlášť v rovině např. po 200° , poté jednotlivé díly nadzvednout a přivařovat vždy pod příslušným úhlem a zajistit tak šroubovitý tvar uvnitř kanálu.

Falešné trubky rozříznuté na polovinu je třeba přivařit na obou stranách kanálu stehovým svarem, aby při najíždění/odstavování zařízení nevznikali teplotní rozdíly uvnitř falešných trubek a vzduchovým kanálem.

Tab. 1 Vybrané výsledné hodnoty. Q - tepelný výkon, Sc - celková teplosměnná plocha, L - délka vinutí trubek, Δt_{log} - střední logaritmický spád, k - prostup tepla, V - objemový tok, w - střední rychlost, α - souč. přestupu tepla, t - teploty médií, Pr - prandtlovo číslo, η - dynamická viskozita, ρ - hustota, m - hmotnostní průtok

Pro danou oblast:	Oblast OV1	Oblast OD2	Oblast PŘ3
Q [kW]	5,856	54,65	0,3048
S _c [m ²]	0,9804	9,56	0,0351
L [m]	12,48	121,7	0,4478
Δt_{log} [°C]	28,16	27,55	54,52
k [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]	212,1	207,5	159
Ze strany vzduchu	Oblast OV1	Oblast OD2	Oblast PŘ3
V _{vz} [m ³ · kg ⁻¹]	0,3126	0,3312	0,3482
w _{vz} [m · s ⁻¹]	12,32	13,83	15,28
α_{vz} [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]	286	302,3	317
tvz ₁ [°C]	155,5	160,5	206,8
tvz ₂ [°C]	160,5	206,8	207,1
Pr _{vz} [-]	1,049	0,6998	0,6994
η_{vz} [Pa · s]	6,631x10 ⁻⁶	7,325x10 ⁻⁶	7,979x10 ⁻⁶
ρ_{vz} [kg · m ⁻³]	3,679	3,472	3,303
m _{vz} [kg · s ⁻¹]	1,15	1,15	1,15
Ze strany vzduchu	Oblast OV1	Oblast OD2	Oblast PŘ3
V _v [m ³ · kg ⁻¹]	5,366x10 ⁻⁵	0,0101	0,0102
w _v [m · s ⁻¹]	0,1549	-	29,59
α_v [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]	1015	812,5	385,3
tv ₁ [°C]	96,6	149,9	149,9
tv ₂ [°C]	149,9	149,9	154,9
Pr _v [-]	1,402	1,06	1,049
η_v [Pa · s]	4,682x10 ⁻⁷	5,507x10 ⁻⁶	5,588x10 ⁻⁶
ρ_v [kg · m ⁻³]	481,7	2,54	2,522
m _v [kg · s ⁻¹]	0,02585	0,02585	0,02585

8. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo vypracovat výpočtový projekt průtočného generátoru páry pro zařízení FLEXIVIT. Provedl jsem tedy ze zadaných vstupních požadavků tepelný výpočet, kdy jsem nejprve zařízení PPG rozdělil na 3 výpočtové oblasti a to na oblast, kde dochází k ohřevu vody, dále na oblast kde dochází ke změně skupenské fáze, tedy odpařovací část, kde se "vyrábí" pára a jako poslední na přehřívací část, kde dochází k přehřátí páry a to nejméně alespoň o 5°C za výstupem ze zařízení.

Z výsledků vyplývá, že teplosměnná plocha, kterou představuje vinutá trubková šroubovice pro mnou navrhnuté zařízení má celkovou délku 135 m. Voda vstupující do zařízení je nejprve teplým vzduchem z kompresoru ohřívána v oblasti OV1 a to na délce cca 12,5 m, kde se dostane na stav sytosti a začne měnit svoji fázi. Změna fáze probíhá v nejdelší oblasti OD2, dlouhé cca 122 m, kde se voda odpařuje při teplotě 149,9°C. Po odpaření vstupuje pára do poslední nejkratší oblasti cca 0,5 m, kde získává parametry přehřáté páry $T'' + 5^{\circ}\text{C}$.

Celkový přehled výsledků jednotlivých veličin je uveden v Tab. 1 a výpočtový projekt jako příloha A.

Pro intenzifikaci prostupu tepla jsem zvolil příčné, vystřídání uspořádání trubek, díky kterému je prostup tepla kolem 20% vyšší, než-li by byl při zvolení trubek za sebou. Postup výroby je stručně popsán v kapitole 7. Zvolené rozměry trubek, vzduchového kanálu a tlakové válcové nádoby jsem zvolil dle omezení velikosti kontejneru FLEXIVIT. Zvolením odlišných rozměrů těchto součástí, popřípadě úpravou parametrů obou médií je možné zvýšit, či snížit tepelný výkon zařízení, ovšem je vždy nutné pamatovat na požadavky či omezení ze strany kontejneru a ostatních zařízení v systému FLEXIVIT.

Seznam použité literatury:

- [1] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*. Praha : ČVUT, 2007. 212 s.
- [2] ČERNÝ, Václav; JANEBA, Břetislav; TEYSSLER, Jiří. *Parní kotle*. SNTL 1983,858s.
- [3] Interní literatura VÍTKOVICE POWER ENGINEERING
- [4] VILIMEC, Ladislav. *Stavba kotlů I*. Ostrava : VŠB-TU, 2002. 116 s.
- [5] VILIMEC, Ladislav. *Stavba kotlů II*. Ostrava : VŠB-TU, 1999. 151 s.
- [6] VILIMEC, L. *Řízení a regulace energetických zařízení*. Skripta VŠB TU Ostrava, 2008. 248 s.
- [7] KADLEC, Z., *Sdílení tepla*, VŠB – TU Ostrava, 2005. 110 s.

Seznam příloh:

Příloha A	Výkres zařízení PPG
Příloha B	Tepelný výpočet v programu EES